



УДК 669.168

Куцин В.С. /д.т.н./, Ольшанский В.И.,
Дедов Ю.Б. /к.т.н./, Филиппов И.Ю. /к.т.н./
ПАО «НЗФ»

Производство

Гасик М.И. /д.т.н./, Гасик М.М. /д.т.н./,
Овчарук А.Н. /д.т.н./, Поляков О.И. /к.т.н./
НМетАУ

Промышленное освоение инновационной технологии и организация крупнотоннажного производства ферросиликомарганца в сверхмощных рудовосстановительных электропечах с применением марганцевого магнезиального агломерата

Изложены физико-химические разработки процессов и создание инновационной технологии выплавки в сверхмощных рудовосстановительных электропечах (РПЗ-63, РПГ-63) ферросиликомарганца на магнезиальных шлаках (9-12 % MgO) с применением в составе шихты марганцевого магнезиального агломерата (5-7 % MgO). Приведены данные о повышении технико-экономических показателей выплавки ферросиликомарганца за счет экономии марганцевых концентратов, кварцита, кокса и электроэнергии. Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: ферросиликомарганец, марганцевый магнезитовый агломерат, отвальный магнезиальносиликатный шлак выплавки ферроникеля, ферросплавная печь, компьютерное моделирование процессов, выплавка, технико-экономические показатели

The physical and chemical process development and the creation of innovative technologies of smelting in the heavy duty ore reduction electric arc furnaces (RPG-63, RPP-63) of ferrosilicon manganese on magnesium slags (9-12% MgO) with the use of manganese magnesite sinter in the charge (5-7% MgO) are presented. The data on the increase of technical and economic parameters of ferrosilicomanganese smelting by saving manganese concentrates, quartzite, coke and electricity are provided.

Keywords: ferrosilicomanganese, manganese magnesite sinter, depleted magnesium silicate slag of ferronickel smelting, ferroalloy furnace, computer modeling of processes, technology of smelting ferrosilicomanganese, technical and economic indicators

В общей структуре марганцевых ферросплавов, выплавляемых на отечественных и зарубежных заводах, наиболее крупнотоннажным является ферросиликомарганец (ДСТУ 3548-97). Как комплексный раскислитель и легирующий ферросплав ферросиликомарганец широко применяется при выплавке стали в кислородных конвертерах, дуговых электропечах, в том числе и дуговой электропечи на заводе «ИНТЕРПАЙП СТАЛЬ», производительностью 1 млн. 300 тыс. т трубной и колесной электропечи в год. Потребность мировой сталеплавильной промышленности в ферросиликомарганце возрастает практически пропорционально росту выплавки стали. Выплавка стали в мире в 2011 г. по сравнению с 2010 г. возросла на 93 млн. т и достигла 1 млрд. 510 млн. т. В соответствии с прогнозами производство стали в 2030 г. составит 1 млрд. 776 млн. т, в том числе в Китае 655, Северной Америке 470, Европейском Союзе 282, Южной Америке 120, России, других странах 164 млн. т. Так что, несмотря на экономические кризисы, периодические спады и подъемы, объем выплавки стали к 2030 г. возрастет, что потребует определенно увеличения и производства марганцевых ферросплавов и, прежде всего, ферросиликомарганца.

В 2011 г. выплавка марганцевых ферросплавов на ферросплавных заводах Украины составила 1036,76 тыс. т, в том числе 770,56 тыс. т в ПАО «НЗФ». Наряду с применением на внутреннем рынке, украинские марганцевые ферросплавы экспортируются в свыше 30 стран мира.

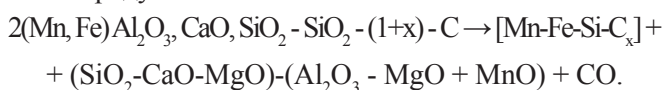
Известно [1], что выплавка марганцевых ферросплавов характеризуется высоким удельным расходом электроэнергии. Установленная электрическая мощность рудовосстановительных электропечей в ПАО «НЗФ» для выплавки ферросиликомарганца и высокоуглеродистого ферромарганца (ДСТУ 3547-97) составляет 63 МВ×А (печи типа РПЗ-63, РПГ-63) и 75 МВ×А (РКЗ-75). В совокупности с другими потребителями электроэнергии установленная электрическая мощность ПАО «НЗФ» составляет 1366 МВ×А, т.е. 10 % выработки электрической энергии Днепровской электроэнергетической системы или 2,5 % потребляемой электрической энергии всей Украины.

В последние десятилетия в результате проводимых в ПАО «НЗФ» научно обоснованных работ по совершенствованию действующих технологий агломерации и выплавки марганцевых ферросплавов разработаны и внедрены инновационные процессы и технологическое оборудование, решено ряд задач

экономического характера, что позволило существенно повысить технико-экономические показатели производства марганцевых ферросплавов. Вместе с тем, структурные составляющие себестоимости ферросиликомарганца и высокоуглеродистого ферромарганца нуждаются в дальнейшем снижении удельных расходов марганцевородного сырья и электроэнергии в связи с непрерывным ростом цен на марганцевые концентраты и электроэнергию.

Теоретические предпосылки инновационной технологии выплавки ферросиликомарганца на магниезальных шлаках

Физико-химический процесс выплавки ферросиликомарганца по действующей технологии основан на восстановлении марганца и кремния из их оксидов марганцевого агломерата и кварцита твердым углеродом. Применяющийся марганцевый агломерат (47 % MnO, 28 SiO₂, 8,5 CaO, 3 FeO, 2,9 % Al₂O₃) характеризуется низким содержанием оксида магния (2,2 % MgO), в связи с чем печные шлаки ферросиликомарганца не в полной мере соответствуют требованиям эффективного непрерывного углеродовосстановительного процесса из-за относительно низкой температуры их плавления и повышенной электропроводности [2]. Химический процесс получения ферросиликомарганца в общем виде может быть представлен схемой участвующих компонентов шихты и получаемых продуктов плавки



Теоретические температуры начала восстановления Mn и Si из чистых оксидов MnO и SiO₂ (условие

$$\left(\alpha_{\text{MnO}} = \alpha_{\text{SiO}_2} = 1 \right) \text{ по реакциям}$$

$$2\text{MnO} + 2\text{C} = 2\text{Mn} + 2\text{CO}$$

$$\Delta G_T^0 = 580590 - 346,4T, \text{ Дж/моль,}$$

$$\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$$

$$\Delta G_T^0 = 669390 - 359,07T, \text{ Дж/моль}$$

соответственно равны 1675K (1402° C) и 1942 K (1669 °C).

Однако, восстановление элементов из их оксидов углеродом всегда сопровождается образованием не чистых марганца и кремния, а их карбидов по реакциям

$$\text{MnO} + (1 + x) \text{C} = \text{MnC}_x + \text{CO},$$

$$\Delta G_T^0(\text{MnC}_x) = 193293 - 123,0 T, \text{ Дж/моль,}$$

$$\text{SiO}_2 + 3\text{C} = \text{SiC} + 2\text{CO}$$

$$\Delta G_T^0(\text{SiC}) = 555615 - 322 T, \text{ Дж/моль}$$

при более низких температурах 1595K (1325 °C) и 1724K (1451°C).

В случае совместного восстановления марганца и кремния карбид кремния термодинамически не

устойчив и взаимодействует с карбидом марганца по реакции



Взаимодействие MnC_x и SiC по приведенной схеме химической реакции с повышением содержания кремния в ферросиликомарганце (по ДСТУ 3548–97) от 10 до 35 % снижается растворимостью углерода в сплаве от 3,5 до 0,5 % соответственно, поскольку термодинамическая прочность силицидов марганца существенно выше его карбидов. Чем выше концентрация кремния в ферросиликомарганце, тем выше температура процесса и больше удельный расход электроэнергии. По взаимосогласованным технологическим позициям производителей ферросиликомарганца и его потребляемой наиболее востребованным на внутреннем и международных рынках является ферросиликомарганец марки MnC17 (≤ 65 % Mn, 15-20 Si, ≤ 2,5 % C). По действующей технологии выплавки ферросиликомарганца в ПАО «НЗФ», ЗФЗ и СтахЗФ полезное использование марганца из шихты, состоящей из марганцевого магниезального агломерата (2,5 % MgO), кварцита и коксика, составляет η_{Mn} ≤ 87 % и η_{Si} ≤ 44 %, т.е. близких к данным зарубежных заводов производителей ферросиликомарганца. При этом достигнут наиболее низкий удельный расход электроэнергии 3150-3950 кВт·ч/т. Общей задачей при производстве ферросиликомарганца является разработка инновационной сквозной технологической схемы, обеспечивающей повышение полезного извлечения марганца и кремния из шихты в ферросиликомарганец и снижение удельного расхода электроэнергии.

Поисковые лабораторные и опытно-промышленные эксперименты показали, что одним из направлений повышения эффективности производства ферросиликомарганца является работа печей на магниезальных печных шлаках [3].

В настоящей работе установлено, что температура ликвидус T_L марганцевого агломерата в зависимости от химсостава описывается следующим уравнением

$$T_L(°C) = 47 \left(\frac{\% \text{MgO}}{\% \text{CaO}} \right) + 27 \left(\frac{\% \text{CaO}}{\% \text{Al}_2\text{O}_3} \right) - 10,7(\% \text{MnO}) + 1952.$$

С ростом отношения %MgO/%CaO повышается температура ликвидус (тугоплавкость) агломератов и, следовательно, температура печного шлака при выплавке ферросиликомарганца. По данным наших исследований температура ликвидус печных шлаков также существенно зависит от содержания MgO, отношений (%CaO)/(%Al₂O₃) и (%MnO)/(%SiO₂) и эта связь представлена уравнением

$$T_L(°C) = 7,84(\% \text{MgO}) + 60(\% \text{CaO}/\% \text{Al}_2\text{O}_3) - 175(\% \text{MnO}/\% \text{SiO}_2) + 1443.$$

Важно отметить, что с ростом содержания MgO в шлаке повышается и коэффициент распределения марганца L_{Mn} между ферромарганцем и печным шлаком [4].

Таблица 1. Удельные расходы шихтовых материалов и химические составы полученных марганцевых магнезиальных агломератов по периодам спекания агломератов и выплавки ферросиликомарганца

Наименование	Периоды производства агломерата АМНВ-2М				
	26.03-04.04. 2012	05.04-17.04 2012	18.04-30.04 2012	01.05-17.05 2012	18.05-31.05 2012
Шихтовые материалы	Удельные расходы, кг/т агломерата				
Марганцевые концентраты:					
1 сорт	172	113	-	-	-
1 сорт ООКНФ	185	127	122	184	241
2 сорт ООНФ	657	475	498	312	605
1 сорт Окис. кон.	-	315	410	479	17
1Б сорт ООНФ	-	-	-	41	165
Шлак ферроникеля	151	142	143	132	121
ПШШ	50	52	46	32	2
Всего марганцевого сырья	1215	1224	1219	1180	1151
Химсостав агломератов	мольная доля компонентов, %				
Mn	36,4	38,4	38,1	39,1	38,9
SiO ₂	28,9	27,4	27,3	26,2	26,2
CaO	5,2	4,9	4,8	4,7	5,1
MgO	7,0	5,9	5,8	5,9	5,5
Fe	3,2	3,1	3,1	3,2	2,9
P	0,16	0,16	0,16	0,16	0,7

Таблица 2. Удельные расходы шихтовых компонентов и электроэнергии при выплавке ферросиликомарганца в базовый и опытный периоды

Наименование	базовый период	Периоды выплавки ферросиликомарганца					
		опытные периоды					
		26.03-04.04	05.04-17.04	18.04-30.04	01.05-17.05	18.05-31.05	
АМНВ-2М	-	1354,1	1405,9	1362,6	1349,5	1441,2	
АМНВ-2	1231,8	-	-	-	-	-	-
АМНВ-2П	165,2	-	-	-	-	-	-
Гана КК28	170,1	178,9	49,5	-	-	-	-
1 сорт карб.кон.	-	-	52,8	121,4	118	95,6	-
кокс	390,2	399,1	367,8	394,0	357,5	369,8	-
кварцит	332	217,1	243,3	257,8	244,2	245,2	
Fe-руда	67,5	41,8	39,1	113,3	90	53,7	
Эл.энергия, кВт*ч/б.т.	3949,6	4061,1	39,0	3931	3872	3902	

$$L_{Mn} = \frac{[\%Mn]}{(\%Mn)} = 0,568(\%MgO) - 0,699, (r = 0,93).$$

Таким образом, данные предварительных опытов подтвердили основные положения исследований о повышении полезного извлечения марганца в ферросиликомарганец при увеличении содержания MgO в печном шлаке [5].

Результаты опытно-промышленного освоения разработанной технологии выплавки ферросиликомарганца

Промышленное широкомасштабное освоение сквозной технологической схемы и процессов производства марганцевого магнезиального агломерата и выплавки с его применением ферросиликомарганца MnC17 проведено в период с 01.03.12 по 31.05.12. При производстве марганцевого магнезиального агломерата в опытную кампанию было использовано 9000 т магнезиально-силикатного отвального шлака выплавки богатого ферроникеля (15-20 % Ni) в ООО «Побужский ферроникелевый комбинат».

Марганцевый магнезиальный агломерат АМНВ-

2М [6] производили в аглоцехе НЗФ на агломашинах АКМ-105 и использовали в составе шихты при выплавке MnC17 в рудовосстановительных дуговых электропечах РПЗ-63 и РПГ-63 единичной мощностью 63 МВ·А. Сводные данные о составах агломерационных шихт и химсоставах агломератов, получаемых в каждом из пяти периодов опытной кампании освоение и внедрение сквозной технологической схемы и процессов приведены в табл. 1.

При выплавке MnC17 в базовый период применялся агломерат АМНВ-2 химсостава (% масс.): 47,4 Mn; 28,5 SiO₂; 8,5 CaO; 2,2 MgO; 2,3 Fe; 0,17 P, а опытный период использовался марганцевый агломерат АМНВ-2М. Для корректировки содержания марганца в шихте и основности печного шлака применялись в отдельные периоды богатая импортная марганцевая руда (Гана КК28) и концентрат марганцевый первого сорта. Сводные данные об удельных расходах шихтовых компонентов при выплавке MnC17 в каждом из пяти периодов приведены в табл. 2.

Данные об изменении содержания марганца в печном (отвальном) шлаке выплавки MnC17, коэф-

Таблица 3. Сравнительные химанализы шлаков выплавки ферросиликомарганца с применением базового и опытного марганцевых агломератов и показатели извлечения марганца и кремния из шихты в ферросиликомарганце

Наименование показателей	Периоды выплавки ферросиликомарганца					
	базовый период	опытные периоды				
		01.03-20.03	26.03-04.04	05.14-17.04	18.04-30.04	01.05-17.05
Выплавка ферросиликомарганца, т	7559,7	4136,5	5675,5	3563,5	6629,0	4875,0
Химсостав шлака. %						
Mn	11,2	8,8	9,7	8,6	9,2	9,5
SiO ₂	50,0	50,1	49,6	49,9	48,8	49,5
CaO	18,1	14,4	14,1	15,2	15,5	15,9
MgO	6,7	11,8	10,5	10,4	9,9	8,8
Al ₂ O ₃	8,1	7,8	7,8	8,6	8,5	8,4
Кратность шлака	1,51	1,53	1,42	1,28	1,32	1,39
Извлечение Mn, %	87,6	88,7	91,0	90,4	92,7	88,33
Извлечение Si, %	44,1	46,1	47,5	46,5	49,5	47,5

фициентов полезного извлечения марганца и кремния из шихты в ферросиликомарганец, а также кратности отвальных шлаков приведены в табл. 3.

Общее количество ферросиликомарганца, выплавленного в опытные периоды составило 24879 т. Анализ данных табл. 3 показывает, что по всем периодам выплавки ферросиликомарганца с применением агломерата АМНВ-2М полезное извлечение марганца из шихтовых марганецсодержащих компонентов в сплав повысилось с 87,6 % в базовый период до 88,7-92,7 % в опытные периоды. При этом соответственно поднялось и извлечение кремния с 44,1 % в базовый период до 46,1-49,5 в опытные периоды.

Взаимосвязь коэффициентов извлечения марганца η_{Mn} и кремния η_{Si} по базовому и опытным периодам выплавки МнС17 хорошо иллюстрируются представленными на рисунке данными.

Из данных табл. 2 следует, что выплавка МнС17 (0,6 % Р) с применением агломерата АМНВ-2М сопровождается снижением удельного расхода кварцита (74,2-114,9 кг/т). В ходе опытной кампании выплавки МнС17 подтверждено, что удельный расход электроэнергии в первую очередь, как известно, от содержания марганца в агломерате и шихте для выплавки МнС17. Так, в первый период исследовательской кампании при снижении содержания марганца в агломерате АМНВ-2М до 36,4 % и в задаваемой шихте до 35,2 % (против 38,2 % по базовому периоду) удельный расход электроэнергии возрос на 111,5 кВт·ч/т; при повышении задаваемого с шихтой марганца до 36,8-37,7 % удельный расход электроэнергии снизился на 18,6-107,6 кВт·ч/т.

Решающий вклад применения марганцево-магнезиального агломерата в повышении технико-экономических показателей выплавки МнС17 подтверждается анализом данных пятого периода опытной кампании. При снижении удельного расхода магнезиально-силикатного шлака в составе аглошхты до 121 кг/т и, следовательно, содержания MgO в отвальном шлаке МнС17 до 8,8 % коэффициент полезного извлечения марганца снизился до 88,3 %.

Таким образом, результаты проведенной 90-су-

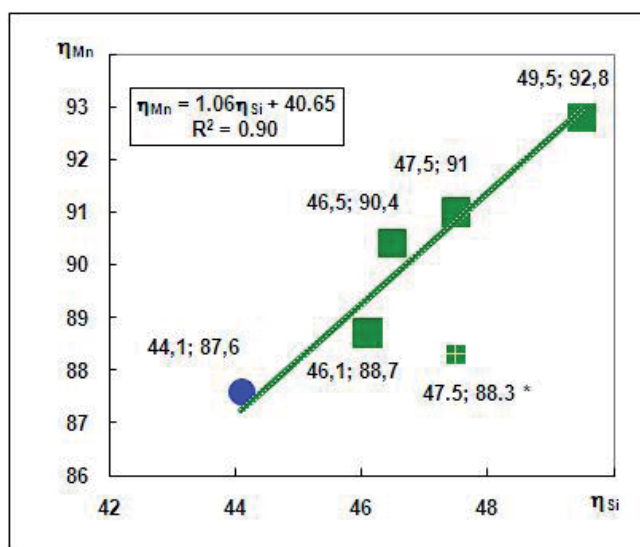


Рисунок. Взаимосвязь коэффициентов извлечения кремния и марганца при выплавке ферросиликомарганца на магнезиальных шлаках с использованием магнезиального агломерата АМНВ-2М: * - пониженное значение η_{Mn} из-за снижения MgO в шлаке до 5,5 %

точной кампании по освоению технологии выплавки МнС17 на магнезиальных шлаках, с применением марганцевого агломерата с повышенным содержанием MgO позволили подтвердить данные теоретических исследований [5] разработать эффективную сквозную технологическую схему, включающую процессы получения марганцевого магнезиального агломерата и выплавки МнС17 с его использованием [7].

Выводы

1. Проанализирована термодинамика реакций отдельного и совместного восстановления марганца и кремния из их оксидов углеродом применительно к высокотемпературным условиям процесса выплавки ферросиликомарганца. Акцентировано внимание и обосновано, что рост температуры в ваннах рудовосстановительных печей можно достичь, повышая температуру «плавления» марганцевого агломерата при увеличении в нем содержания оксида магния.

2. Разработана, промышленно освоена и внедре-

на технология производства марганцевого магнезиального агломерата АМНВ-2М с применением в аглошихт магнезиально-силикатного отвалного шлака (30 % MgO, 50 SiO₂, 4,6 CaO и 2,5 % Al₂O₃) выплавки богатого ферроникеля (18-20 % Ni) в ООО «Побужский ферроникелевый комбинат». Новизна и промышленная полезность разработанной технологии защищены патентом [7].

3. Разработана, промышленно освоена и внедрена технология выплавки в сверхмощных рудовостановительных электропечах типа РПЗ-63 и РПГ-63 ферросиликомарганца MnC17 на стабильных магнезиальных шлаках (9,9-11,8 % MgO, 48,8-50,1 SiO₂, 8,6-9,9 % Mn).

4. По итогам опытно-промышленной кампании (в период март-май 2012 г.) производства агломерата АМНВ-2М и выплавки MnC17 с применением этого агломерата, достигнуто существенное улучшение технико-экономических показателей: снижены удельный расход электроэнергии на 64 кВт×ч/т, марганцевого сырья на 39 кг/т, коксика на 12 кг/т и кварцита на 39 кг/т. При этом достигнуто повышение коэффициентов полезного извлечения из марганца из шихты с 87,6 % (базовая технология) до 88,7-91,0 % (опытная технология) и кремния с 44,1 до 46,1-49,5 %.

5. В ходе проведения масштабной опытной кампании установлены новые взаимосвязи коэффициентов извлечения марганца и кремния в зависимости от соотношения компонентов шихты и химических составов шлаков, которые подлежат теоретическому обоснованию и опытно-промышленной проверке с целью выявления условий дальнейшего снижения удельного расхода электроэнергии.

Библиографический список

1. Гасик М.И. МАРГАНЕЦ. – М.: Металлургия, 1992. – 702 с.

2. Гасик М.М., Куцин В.С., Гасик М.И. Математический анализ экспериментальных данных электропроводности шлаковых расплавов системы MnO-SiO₂-CaO производства марганцевых ферросплавов // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2011. - № 2. – С. 32-37.

3. Гасик М.И., Кучер И.Г., Величко Б.Ф. Промышленное опробование технологии получения марганцевого агломерата и выплавки силикомарганца с его использованием // *Сталь.* - 1988. - № 11. - С. 34-36.

4. Куцин В.С., Гасик М.М. Разработка сквозной технологической схемы и процессов получения марганцевого магнезиального агломерата и выплавки ферросиликомарганца // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* - 2011. - № 6. – С. 12-16.

5. Куцин В.С., Гасик М.И. Разработка и освоение технологии выплавки ферросиликомарганца с применением марганцевого магнезиального агломерата // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2012. - № 2. - С. 21-28.

6. Куцин В.С., Гасик М.И. Производство марганцевого магнезиального агломерата с использованием обогащенной никопольской марганцевой руды и отвалного магнезиально-силикатного шлака выплавки ферроникеля // *Сталь.* – 2012. - № 1. – С. 22-28.

7. Пат. 99087А Украина, МПК С22В 47/00. Шихта для виробництва марганцевого агломерату / В.С. Куцин, М.І. Гасик, заявник та патентовласник Національна металургійна академія України. - № 0201201299; заявл. 08.02.2012; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

Поступила 05.12.2012

УДК 669.15-198

Зубов В.Л. /д.т.н./
НМетАУ

Наука

Исследование влияния фазового состава ферросилиция машинной разливки на устойчивость к рассыпанию

Изложены обобщённые результаты исследований химического состава основных структурных составляющих и избыточных фаз выделения в слитках 75%-ного ферросилиция промышленной выплавки и разлитого на конвейерной машине. Ил. 4. Табл. 3. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: ферросилиций, фазовый состав, микроструктура, механизированная разливка, фракционирование

Generalized results of research of the chemical composition of the major structural components and excess phases of allocation of 75% aqueous industrial ferrosilicon in ingots cast on the conveyor machine are presented.

Keywords: ferrosilicon, phase composition, microstructure, machine casting, fractionation

Постановка задачи исследования

Анализ экспортных поставок украинского ферро-

силиция на зарубежные рынки ферросплавов показывает неуклонный рост количества высококремнистых марок ФС65, ФС70 и ФС75 с содержанием кремния